

- работоспособность покрытия резко возрастает при скоростях резания более 150 м/мин, когда оно повышает сопротивляемость твердосплавной матрицы диффузионному растворению в обрабатываемом материале [4];
- нанесение износостойких покрытий способствует смещению уровня оптимальных скоростей резания в сторону их увеличения, причем, карбидотитановое покрытие способствует увеличению уровня V_0 от 1,5 до 2,1 раза, а нитриidotитановое – только от 1,2 до 1,5 раз;
- покрытие способствует приближению неконкурентноспособных, по режущим свойствам, инструментальных материалов к лучшим маркам твердого сплава, так, при фрезеровании, инструмент из твердого сплава без покрытия изнашивается быстрее, чем инструмент из карбидостали, но инструмент из твердого сплава с покрытием $TiAlN$ изнашивается на порядок дольше, чем инструмент из карбидостали без покрытия.

Список литературы

1. Андреев А.А., Гаврилов А.Г., Падалко В.Г. Прогрессивные технологические процессы в инструментальном производстве. – М.: Машиностроение, 1981.–214 с.
2. Верещагин А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. - М.: Машиностроение, 1986.–192 с.
3. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента.–М.: Машиностроение, 1982.–320 с.
4. Старков В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ.– М.: Машиностроение, 1984.–120 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Павлов В.П., Кудоярова В.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Ряд стеклопластиков создает эффективную преграду для тепловых потоков и поэтому их широко применяют в качестве теплозащиты летательных аппаратов и их двигательных установок.

Объясняется это тем, что:

- стеклопластики обладают низкой теплопроводностью;
- в стеклопластиках при высоких температура происходят физико-химические превращения с поглощением тепла;
- при термическом разложении стеклопластиков выделяются наружу продукты пиролиза, которые существенно влияют на гидродинамическое и тепловое взаимодействие обтекаемой поверхности с набегающим газовым потоком.

Для учета влияния продуктов разложения стеклопластика на процессы теплообмена необходимо экспериментальное изучение кинетики изменения массы стеклопластика при переменных во времени высоких температурах и построение математической модели, описывающей этот процесс.

Решение данных задач рассматривается в данной статье.

Экспериментальные исследования

Изучалось изменение массы стеклопластика КТ-11-К-Ф при линейных во времени t законах изменения температуры

$$T = T_0 + bt \quad (1)$$

с начальной температурой $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и трех скоростях нагрева $b = 1; 3,3; 10$ град/с.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании, описанном в [1, 2].

При испытаниях регистрировалась масса образца в виде функции от температуры $G = G(T)$. В качестве меры изменения массы рассматривалась относительная величина

$$m = (G_0 - G)/G_0, \quad (2)$$

где G_0 - масса образца перед началом испытания.

Температурные зависимости $m(T)$ для трех законов нагрева представлены на рис. 1.

Видно (рис. 1), что с увеличением скорости нагрева кривые $m(T)$ смещаются в сторону высоких температур.

Таким образом (рис. 1), можно утверждать, что для изучаемого стеклопластика изменение массы в существенно зависит от конкретного закона изменения температуры во времени $T(t)$.

Математическая модель

Рассмотрим случай произвольного закона изменения температуры

$$T = T(t). \quad (3)$$

Учтем, что потеря массы стеклопластика происходит только при температуре T , равной или превышающей температуру начала термодеструкции T_s

$$T \geq T_s. \quad (4)$$

Математическую модель изменения массы при выполнении условия (4) примем в форме дифференциального уравнения следующего вида

$$\frac{dm}{dt} = a(T)f(m), \quad T \geq T_s, \quad (5)$$

где $a(T)$ - некоторая функция от температуры,

$f(m)$ - функция от массы.

Преобразуем (5)

$$\left\{ \frac{dm}{f(m)} = a(T) dt, \quad T \geq T_s, \right. \quad (6)$$

и определим определенные интегралы от левой и правой частей равенства (6)

$$\int_0^m \frac{dm}{f(m)} = \int_{t_s}^t a(T) dt, \quad (7)$$

где t_s - момент времени, в который начинается процесс потери массы из-за достижения температуры начала термодеструкции $T_s = T(t_s)$;

t - текущий момент времени;

m - потеря массы в текущий момент времени t .

Учитывая (7), введем обозначения

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{F}(m) &= \int_0^m \frac{1}{f(m)} dm, \\ \xi &= \int_{t_s}^t a[T(t)] dt, \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где величина ξ названа приведенным временем.

С учетом обозначений (8) равенство принимает вид

$$\tilde{F}(m) = \xi. \quad (9)$$

Из равенства (9) следует, что между приведенным временем ξ и величиной потери массы m существует однозначная связь, не зависящая от закона нагрева $T(t)$.

Решив (9) относительно m , получим

$$m = \chi(\xi). \quad (10)$$

Назовем $\chi(\xi)$ обобщенной функцией потери массы.

Определение параметров математической модели

Для определения параметров математической модели потери массы преобразуем уравнение (5)

$$\frac{dm}{dT} \frac{dT}{dt} = a(T) f(m), \quad (11)$$

и для закона нагрева **Ошибка! Источник ссылки не найден.** из (11) получим

$$\frac{1}{f(m)} dm = \frac{a(T)}{b} dT. \quad (12)$$

Опишем функцию $a(T)$ выражением

$$a(T) = 10^{\psi(T-T_s)}, \quad (13)$$

где ψ - некоторый коэффициент;

T_s - температура начала термодеструкции.

Для рассматриваемого стеклопластика процесс пиролиза начинается при температуре порядка 123°C (рис.1). Поэтому принимаем $T_s = 123^\circ\text{C}$.

Проинтегрировав (12) с учетом (13), получаем

$$F(m) = \frac{1}{b\psi} \frac{1}{\ln 10} (10^{\psi(T-T_s)} - 1) \quad (14)$$

при

$$F(m) = \int_{m_s}^m \frac{1}{f(m)} dm. \quad (15)$$

Рассмотрим два линейных закона нагрева

$$\begin{cases} T_1 = T_o + b t, \\ T_2 = T_o + k b t, \end{cases} \quad (16)$$

где k - некоторая постоянная.

Функция $F(m)$ не зависит от закона нагрева, и потому при одинаковых значениях m согласно (14) справедливо равенство

$$\left(10^{\psi(T_1-T_s)} - 1 \right) = \frac{1}{k} \left(10^{\psi(T_2-T_s)} - 1 \right). \quad (17)$$

При достаточно больших значениях $\psi(T_1 - T_s)$ и $\psi(T_2 - T_s)$ можно принять

$$\begin{cases} 10^{\psi(T_1-T_s)} - 1 \approx 10^{\psi(T_1-T_s)}, \\ 10^{\psi(T_2-T_s)} - 1 \approx 10^{\psi(T_2-T_s)}. \end{cases} \quad (18)$$

Подставив (18) в (17), получим формулу для определения коэффициента ψ

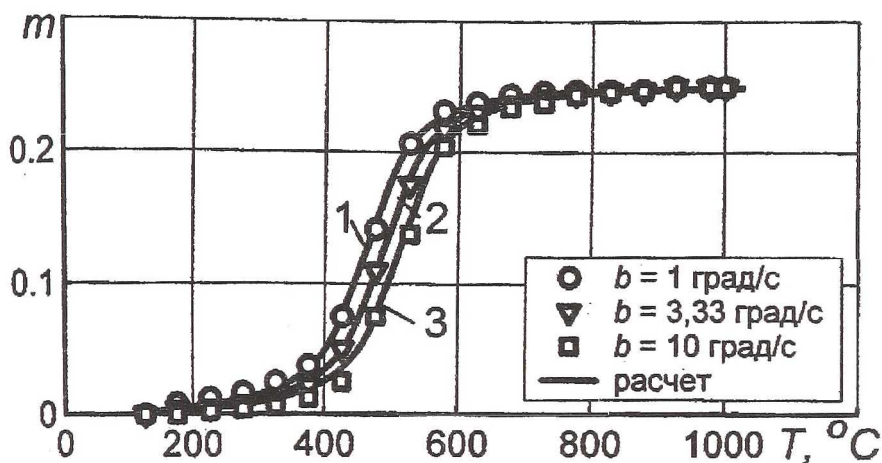


Рис. 1. Зависимость потери массы m от температуры T для линейных законов изменения температуры $T = 20 + bt$ при:

1) $b = 1$ град/с; 2) $b = 3,33$ град/с; 3) $b = 10$ град/с.

Точки – эксперимент. Сплошная линия – обобщенная кривая

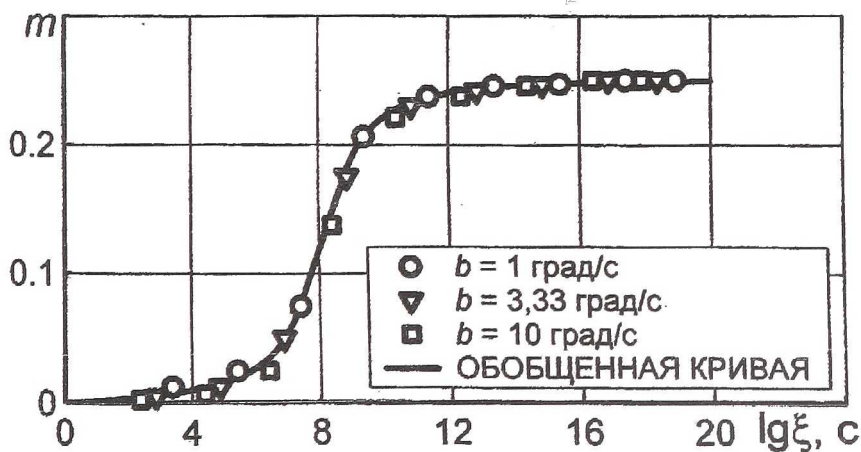


Рис. 2. Зависимость потери массы m от логарифма приведенного времени $\lg \xi$ при температуре приведения $T_S = 123$ C.

Точки – эксперимент. Сплошная линия – обобщенная кривая

$$\psi \approx \frac{\lg k}{T_2 - T_1}. \quad (19)$$

Из формулы (19) следует, что в случае нагрева по линейным законам (16) при одинаковых значениях m , начиная с некоторой температуры, выполняется соотношение

$$T_2 - T_1 \approx \frac{\lg k}{\psi} = \text{inv}(T) = \text{const}. \quad (20)$$

А это означает, что графики температурных зависимостей потери массы в координатах $m \sim T$, начиная с некоторой температуры, становятся эквидистантными для смещения вдоль оси температур T . Это и наблюдается на рис.1, где при температуре $T > 323^\circ\text{C}$ термогравиметрические кривые практически эквидистантны для смещения вдоль оси температур T .

По экспериментальным кривым, представленным на рис.1, получаем $\psi = 0,02$.

При данном значении ψ погрешность соотношений (18) при температурах $T > 323^\circ\text{C}$ менее 0,01 %, и, значит, сделанные выше предположения достаточно точны.

Определившись с функцией $a(T)$, учтем, что температура является функцией времени $T = T(t)$ и из (5) получим

$$\tilde{F}(m) = \xi, \quad (21)$$

где m - потеря массы в текущий момент времени t .

Для определения функции $\chi(\xi)$ воспользуемся температурной зависимостью потери массы $m(T)$, определенной при нагреве со скоростью $b = 3,33$ град/с (рис.1).

При этом для расчетных моментов времени t_i , $i = 1, 2, \dots$ определяем по формулам **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, (8) температуру и приведенное время ξ_i . Затем каждому приведенному времени ξ_i ставим в соответствие потерю массы $m(T_i)$, определенную из рис. 1 по известной температуре T_i .

Построенная таким образом обобщенная кривая изменения массы $\chi(\xi)$ для температуры приведения $T_s = 123^\circ\text{C}$ представлена точками на рис.2 и затем аппроксимирована выражениями

$$\left\{ \begin{array}{ll} m = 0, & T \leq T_s; \\ m = \frac{0,42176}{100 - 20,154 \lg \xi + (\lg \xi)^2} - \\ - 0,4217 \cdot 10^{-2} \cdot (7,4 - \lg \xi) / 7,4, & \lg \xi \leq 7,4; \\ m = -0,454 + 0,07141 \cdot \lg \xi, & 7,4 \leq \lg \xi \leq 8,8; \\ m = \frac{2,1459 \cdot 10^3}{2,745 \cdot 10^3 \lg \xi - (\lg \xi)^5} + 0,25, & \lg \xi \geq 8,8; \\ \xi = \int_{t_s}^t 10^{0,02[T(t) - T_s]} dt, & T > T_s. \end{array} \right. \quad (22)$$

Обобщенная кривая потери массы, построенная в соответствие с (22), показана на рис.1 сплошной линией.

Для оценки точности данной математической модели изменения массы были рассчитаны зависимости m от температуры T при трех линейных законах нагрева. Видно (рис.1), что расчетные кривые достаточно близки к экспериментальным результатам.

Основные результаты

Проведены экспериментальные исследования потери массы стеклопластика КТ-11-К-Ф при переменных высоких температурах.

Предложена математическая модель описания изменения массы стеклопластика при высоких температурах.

Разработан алгоритм определения параметров данной модели по результатам испытаний при линейных законах нагрева.

Произведена проверка точности модели путем сравнения расчетных и экспериментальных результатов.

Список литературы

1. Сендерович Р.Б., Павлов В.П., Первушин Ю.С. Установка для термогравиметрических исследований композиционных полимерных материалов. // Межвуз. научн. сбор. Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей / Уфимск. авиац. ин-т – 1981. – Вып. 5. – с. 77 – 80.
2. Первушин Ю.С., Павлов В.П., Звонарев В.Д. и др. Установка для механических испытаний неметаллических материалов при интенсивном высокотемпературном нагреве. // Заводская лаборатория. – 1979. – № 7. – с. 673 – 675.